УДК 621.317.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПО МАССИВАМ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

А.О. Сулайманов, Е.И. Гольдштейн

Томский политехнический университет
E-mail: sao@tpu.ru

Для определения неактивной мощности предложено использовать интегралы обратной мощности за четверть периода, для определения мощности сдвига – площадь вольт-амперной характеристики, а мощность искажения находить как разность между неактивной мощностью и мощностью сдвига. Показана работоспособность предложенных методик для одно- и трехфазных цепей переменного тока.

При рассмотрении методик определения неактивной мощности и ее составляющих в несинусоидальных режимах авторами была проведена ревизия известных и предложены новые алгоритмы для одно- и трехфазных цепей [1–6].

Ниже кратко рассматриваются основные расчетные формулы (п. 1), результаты экспериментальных исследований однофазных (п. 2) и трехфазных (п. 3) цепей, а также выводы и рекомендации (п. 4).

1. Основные понятия и расчетные формулы

В ходе исследований авторы использовали следующие понятия:

- мощность сдвига Q_C (реактивная мощность сдвига) – часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, обусловленные взаимодействием одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения;
- мощность искажения $Q_И$ – часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, обусловленные взаимодействием разных по частоте гармоник тока и напряжения;
- неактивная мощность $Q_Н$ (полная реактивная мощность) – реактивная мощность, которая характеризует процессы взаимодействия всех без исключения гармоник тока и напряжения.

В развитие работ О.А. Маевского [7] мощность сдвига предложено определять через площадь ($F_{ВАХ}$) вольт-амперной характеристики (ВАХ) [1]

$$Q_C = \frac{1}{4\pi}F_{BAX} = \frac{1}{4\pi}\sum_{j=1}^{N}[(u(t_j)-u(t_{j+1}))((i(t_j)+i(t_{j+1}))], \quad (1)$$

где $u(t_j)$, $u(t_{j+1})$, $i(t_j)$, $i(t_{j+1})$ – значения напряжения и тока в дискретные моменты времени

$$t_{j-1},\quad t_j,\quad t_{j+1},\quad t_j - t_{j-1} = \Delta t,$$

Δt – шаг дискретизации массивов тока (напряжения).

Для определения неактивной мощности, в развитие работ Ю.В. Бакова [8], предложено использовать интегралы мгновенной обратной мощности ($p_{обр}$) за четверть периода

$$Q_I = \frac{4}{T}\int_0^{T/4} p_{обр}(t)dt = \frac{4}{N}\sum_{j=0}^{N/4} p_{обр}(t_j);$$

$$Q_{II} = \frac{4}{T}\int_{T/4}^{T/2} p_{обр}(t)dt = \frac{4}{N}\sum_{j=N/4}^{N/2} p_{обр}(t_j);$$

$$Q_{III} = \frac{4}{T}\int_{T/2}^{3T/4} p_{обр}(t)dt = \frac{4}{N}\sum_{j=N/2}^{3N/4} p_{обр}(t_j);$$

$$Q_{IV} = \frac{4}{T}\int_{3T/4}^{T} p_{обр}(t)dt = \frac{4}{N}\sum_{j=3N/4}^{N} p_{обр}(t_j).$$

Обратная мгновенная мощность рассчитывается при ранее найденной активной (средней за период) мощности:

$$p_{обр}(t) = p(t) - P;$$

$$p(t) = u(t)\,i(t);$$

$$P = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} p(t);$$

$$N = \frac{T}{\Delta t};$$

T – период функции тока (напряжения).

Неактивная мощность рассчитывается по формуле

$$Q_H = \frac{1}{2}(Q_I + Q_{III}) = \frac{1}{2}(Q_{II} + Q_{IV}). \quad (2)$$

Формулы для прямого определения мощности искажений авторам не известны, поэтому предлагается определять ее через неактивную мощность (2) и мощность сдвига (1)

$$Q_И = Q_H - Q_C.$$

В трехфазных четырехпроводных электрических цепях суммарные неактивные мощности определяются как сумма неактивных мощностей фаз.

$$Q_\Sigma = Q_A + Q_B + Q_C.$$

В трехфазных трехпроводных цепях, при недоступной нулевой точке, трехфазная цепь рассматривается как двухфазная с нулевым проводом, где роль нулевого провода играет третья фаза.

$$Q_\Sigma = Q_{AC} + Q_{BC}. \quad (3)$$

Для проверки работоспособности описанных процедур были проведены вычислительные эксперименты для одно- и трехфазных цепей. При получении массивов токов и напряжений использовалась программа моделирования PSpice. При моделировании процедур определения неактивной мощности и ее составляющих были использованы оригинальные программы, созданные в среде Delphi.

2. Однофазные цепи

В таблице приведены основные результаты вычислительных экспериментов.

На рис. 1 и 2 приведены графики $u(t)$, $i(t)$, мгновенной $p(t)$ и активной мощности P, обратной мощности $p_{обр}(t)$, а также построена ВАХ для примеров № 4 и № 8.

Первый пример в таблице показывает работоспособность формул (1) и (2) для синусоидального режима. В случае появления нечетной гармоники в токе или в напряжении (примеры № 2, 3, 3а) мощность сдвига не изменяется, а неактивная мощность изменяет свое значение на величину мощности сдвига. Это подтверждают примеры № 5 и 6, где

Таблица. *Результаты экспериментальных расчетов для однофазной цепи*

№ примера	Напряжение и ток	Активная мощность	Неактивная мощность	Мощность сдвига	Мощность искажения
		P, Вт	Q_H, вар	Q_C, вар	$Q_И$, вар
1	$u(t)$=300sinωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)	335	461,1	461,1	0
2	$u(t)$=300sinωt+100sin3ωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54);	335	616,6	461,1	155,5
3	$u(t)$=300sinωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)+0,513sin(3ωt–75,1)	335	387,1	461,1	-74
3а	$u(t)$=300sinωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)+0,513sin(3ωt+75,1)	335	535,1	461,1	74
4	$u(t)$=300sinωt+100sin3ωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)+0,513sin(3ωt–75,1)	341,6	550,8	535,5	15,3
5	$u(t)$=300sinωt; $i(t)$=0,513sin(3ωt–75,1)	77	74	0	74
6	$u(t)$=100sinωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)	190	155,5	0	155,5
7	$u(t)$=100sinωt; $i(t)$=0,513sin(3ωt–75,1)	25,7	8,26	74,4	-66,1
8	$u(t)$=300sinωt+100sin2ωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)+0,74sin(2ωt–68,2)	612,1	461,1	529,8	-68,7
9	$u(t)$=300sinωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)+0,74sin(2ωt–68,2)	580,7	461,1	461,1	0
9а	$u(t)$=300sinωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)+0,74sin(2ωt+68,2)	580,7	461,1	461,1	0
10	$u(t)$=300sinωt+100sin2ωt; $i(t)$=3,8sin(ωt–54)	600,1	461,1	461,1	0

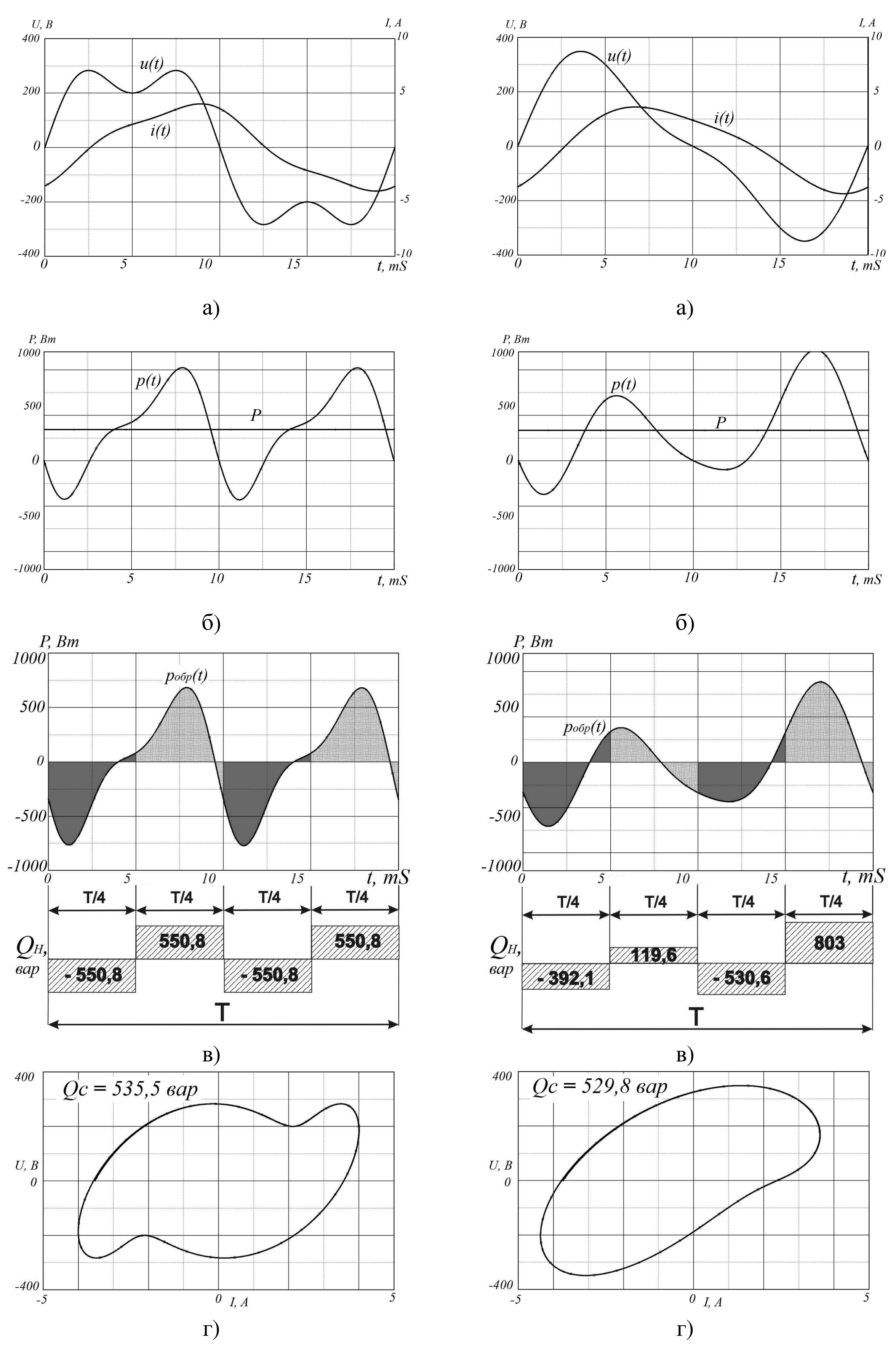
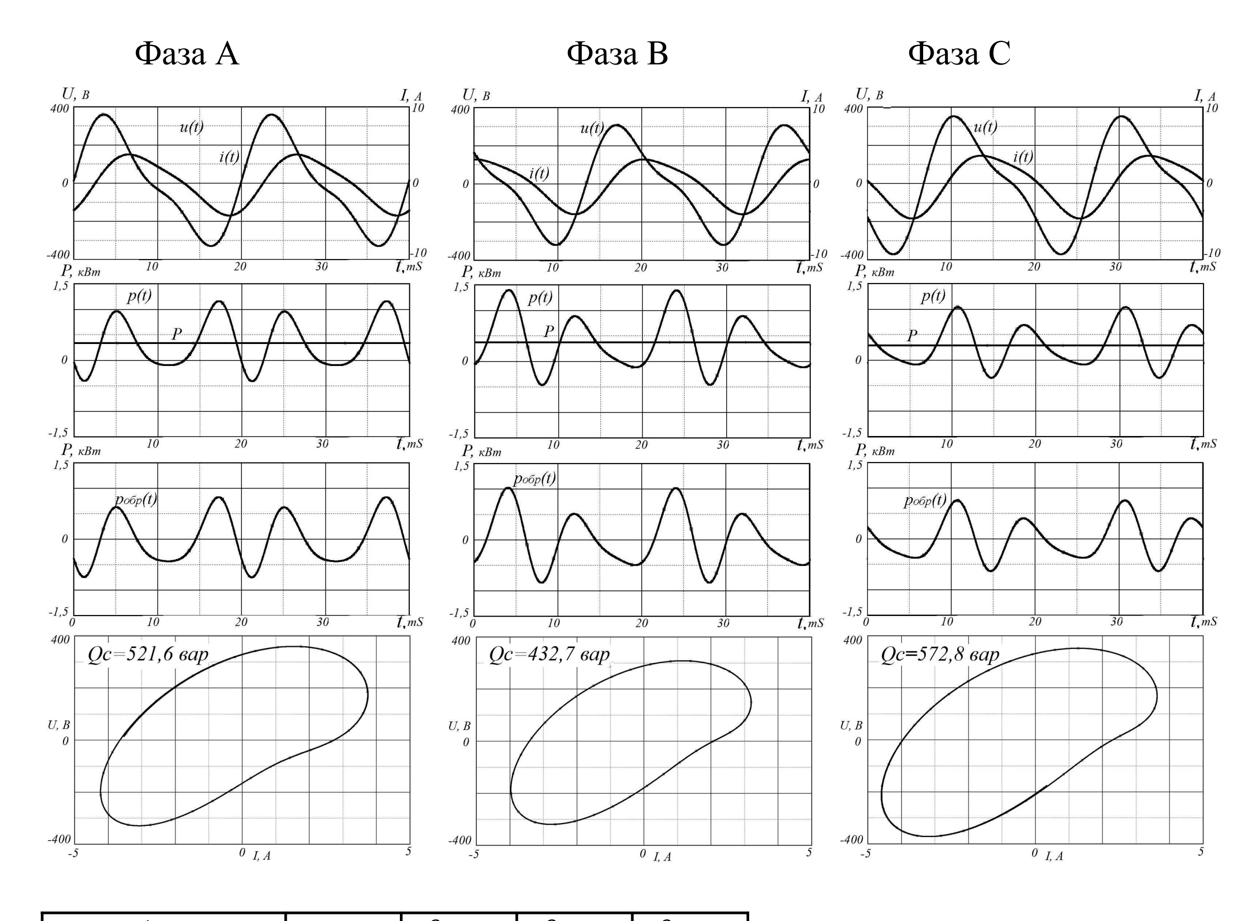


Рис. 1. *Графики для примера № 4*

Рис. 2. *Графики для примера № 8*



Фазы	*P*, Вт	Q_H, вар	Q_C, вар	$Q_И$, вар
A	341,7	420	521,6	101,6
B	284,6	388,9	432,7	43,6
C	375,6	518,7	572,8	54,1
Для трехфазной системы	1001,9	1327,6	1527,1	199,5

Рис. 3. *Графики и результаты расчетов для примера № 11*

показаны результаты расчетов для случаев взаимодействия основной и третьей гармоник. Следует отметить изменение знака мощности искажений при изменении знака фазы нечетной гармоники (примеры № 3, 3а). Пример № 7 демонстрирует, что для случая, когда в токе и напряжении присутствует только нечетная гармоника, мощность сдвига определяется правильно, что нельзя сказать о неактивной мощности и мощности искажения. Значение последней в этом случае должно равняться нулю.

В случаях с четными гармониками (примеры № 8–10) мощность искажения при определении неактивной мощности не учитывается. А мощность сдвига рассчитывается правильно. Кроме того в неактивной мощности не учитывается и реактивная мощность третьей гармоники.

3. Трехфазные цепи

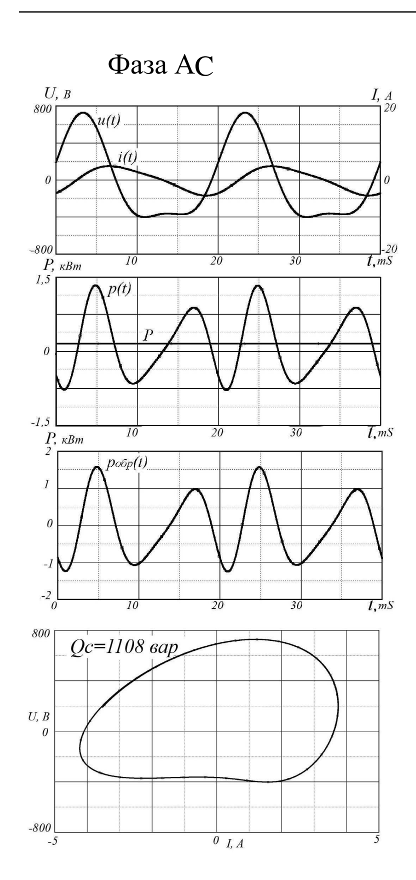
На рис. 3 показаны графики напряжений, токов и мощностей отдельных фаз трехфазной четырехпроводной сети (пример № 11). Здесь же приведены результаты расчетов мощностей $Q_Н$, $Q_С$, $Q_И$ для каждой фазы и системы в целом, при несимметрии токов и напряжений отдельных фаз и наличия в них нечетных гармоник.

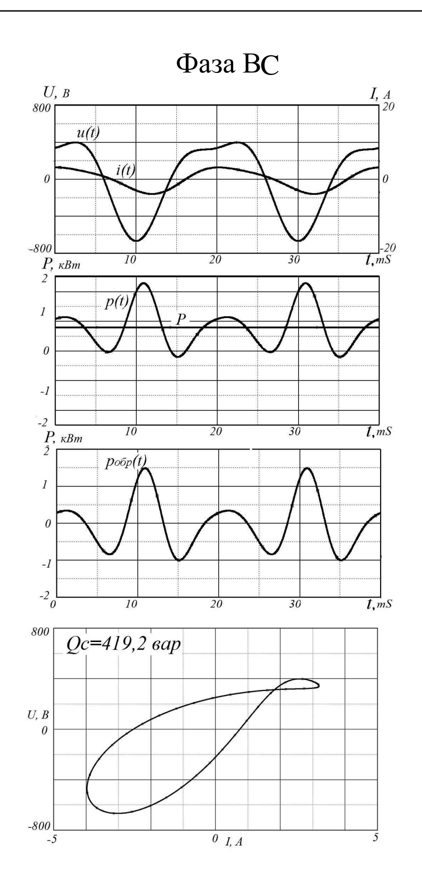
На рис. 4 приведены графики и результаты расчета суммарной мощности трехфазной трехпроводной цепи (пример № 12) через мощности искусственных фаз AB и BC, см. формулу (3). Фазные токи и напряжения – как в примере № 11.

Сопоставление результатов расчетов трехфазной цепи представленные на рис. 2 и 3 показывают, что для методики с использованием искусственных фаз AC и BC годится только формула определения мощности сдвига (1).

4. Выводы

4.1. Примеры № 1, 2, 4–8 убедительно показывают, что мощность сдвига определяется только одинаковыми по частоте гармониками тока и напряжения.





Фазы	P, Вт	$Q_Н$, вар	$Q_С$, вар	$Q_И$, вар
АС	206,4	754,6	1108	353,4
ВС	795,5	726,3	419,2	-307,1
Для трехфазной системы	1001,9	1480,9	1527,2	46,3

Рис. 4. *Графики и результаты расчетов для примера № 12*

4.2. Примеры № 3 и 3а свидетельствуют об изменении знака мощности искажения при изменении знака фазового сдвига третьей гармоники тока. Это говорит о том, что мощность искажения учитывается в неактивной мощности, определяемой по формуле (5).

4.3. Примеры № 9, 9а, 10 подтверждают мнение о том, что в неактивной мощности, формула (2), не учитывается мощность искажения при взаимодействии нечетных и четных гармоник тока (напряжения).

4.4. Примеры № 11, 12 подтверждают работоспособность предложенного авторами способа измерения мощности сдвига в трехфазной трехпроводной цепи при недоступности нуля нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения // Под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
2. Сулайманов А.О. Реактивная мощность в несинусоидальных режимах однофазной цепи // Современные техника и технологии: Труды 8-й Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученных. – Томск, Изд-во ТПУ, 2002. – Т. 1. – С. 62–63.
3. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. Использование циклической вольт-амперной характеристики при экспериментальных исследованиях электротехнических устройств и систем // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Труды Всеросс. научно-практ. конф. – Томск, 2002. – С. 42–44.
4. Goldstein E., Batseva N., Sulaimanov A., Valov B. Ein Berechnungsverfahren von Lastcharakteristika durch Momentanwerte von Stromen und Spanungen // Technische Universität Ilmenau. 48 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium, 22–25 Sept. 2003. – Tagungsband, 2003. – S. 569–570.
5. Пат. 2223509 РФ. МПК[7] G01R 21/06. Способ измерения мощности искажения в однофазной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 29.04.2002.
6. Пат. на ПМ 41373 РФ. МПК[7] G01R 21/00. Устройство для измерения реактивной мощности сдвига в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 07.06.2004.
7. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
8. Баков Ю.В. Мощность переменного тока. – Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического ун-та, 1999. – 252 с.